第八章

气体动理论

第8章 气体动理论

热学：研究热现象及其规律的理论

研究方法 { 宏观的热力学 / 微观的统计力学　　热力学系统（系统），由大量微观粒子组成的宏观物体或物体系

微观量：粒子质量，速量，能量

宏观量：压强，温度，体积

8.1 平衡态理想气体物态方程

1、物质微观特征

① 物质由大量分子组成：阿伏加德罗常量 $N_A=6.022\times10^{23}/mol$

② 分子处于永不停息的无规则运动中：布朗运动

③ 分子之间进行着频繁碰撞　　斥 $r_0 \approx 10^{-10}m$

④ 分子之间存在相互作用力　　引　　$r>10^{-9}$ 忽略

2、气体的状态参量（宏）

1. 压强 P　$1Pa=1N\cdot m^{-2}$　标准大气压：45°, 0°C, 海平面

$1atm=1.01\times10^5 Pa$

2. 体积 V　几何描述　$1m^3=10^3 L$

3. 温度 T　热学描述　(K) 开尔文　$T=273.15+t$

3、气体系统的平衡态

不受外界影响，达到稳定宏观性质，为平衡态

(PVT) 特点：单一性　稳定性　自发过程的终点、热动平衡

4、理想气体状态方程

$$pV=\nu RT=\frac{M}{\mu}RT$$　气体质量 M，摩尔质量 μ

物态方程一　　R：摩尔气体常量 $R=8.31J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$

物态方程二：$P=nkT$　　$k=\frac{R}{N_A}=1.38\times10^{-23}J\cdot K^{-1}$

气体分子数密度 $n=N/V$　　玻耳兹曼常量

理想气体分子模型

1. 分子看作质点　2. 除分子碰撞瞬间外，忽略分子间的相作用

3. 碰撞均为完全弹性碰撞　4. 气体分子在运动中遵从经典力

8.2 理想气体的压强和温度

1. 理想气体的压强公式　　分子数密度 $n=\frac{N}{V}$ $\frac{分子数}{体积}$

$p=m\sum_i n_i v_{ix}^2$　　$\therefore p=nm\overline{v_x^2}$

$\because$ 各向均等 $\therefore \overline{v_x^2}=\overline{v_y^2}=\overline{v_z^2}$　$\therefore p=\frac{1}{3}nm\overline{v^2}$

$\therefore P=\frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}_k$　　$\bar{\varepsilon}_k=\frac{1}{2}m\overline{v^2}$ 平均平动动能

把宏观量压强和微观量分子平动动能联系

$\bar{\varepsilon}_k=\frac{3}{2}kT$，处于平衡态时的理想气体，$\bar{\varepsilon}_k$ 与 T 成正比

温度标志着物体内部分子热运动的剧烈程度，是大量分子热运动的平均平动动能的量度

2、温度的微观解释

$$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$　$\sqrt{\overline{v^2}}$ 方均根速率，统计平均值

8.3 能量均分定理　理想气体的内能

1. 自由度：（坐标数）

质点的自由度：线一 面二 空间三

自由刚体有6个自由度：3平动自由度确定质心位置，3转动自由度确定通过质心轴线的方位 $\cos^2\alpha+\cos^2\beta+\cos^2\gamma=1$

当刚体受到限制时，其自由度也会减少

关于非刚体的物体

1. 单原子分子：3个平动自由度

温度 高 2. 非刚性的双原子分子 (H_2 O_2 N_2)：3平动 2转动 1振动

温度 低 3. 刚性双原子分子：3平动 2转动

4. 刚性多原子分子：本科不考

2、能量均分定理

在温度为T的平衡态下，分子的每个自由度都具有相同的平均动能，为 $\frac{1}{2}kT$

t：平动自由度　r：转动自由度　s 振动自由度

分子平均动能 $\bar{\varepsilon}_k=\frac{t}{2}kT+\frac{r}{2}kT+\frac{s}{2}kT=\frac{1}{2}(t+r+s)kT$

3、理想气体的内能

内能：动能 + 分子间势能 + 原子间振动势能

理想气体内能：无分子间势能　　$\bar{\varepsilon}_p=\frac{s}{2}kT$

分子平均能量 $\bar{\varepsilon}_k+\bar{\varepsilon}_p=(r+t+2s)\frac{1}{2}kT$

$\therefore$ 质量为 M，摩尔质量为 μ 的理想气体内能：

$$U=\frac{M}{\mu}N_A\bar{\varepsilon}=\frac{1}{2}\frac{M}{\mu}(i+s)RT \quad (i=t+r+s)$$

$$\boxed{\Delta U}=\frac{1}{2}\frac{M}{\mu}(i+s)R\boxed{\Delta T}$$

1mol 单分子分子	1mol 双原子分子（非刚性）	1mol 刚性双原子分子
$U=\frac{3}{2}RT$	$U=\frac{7}{2}RT$	$U=\frac{5}{2}RT$

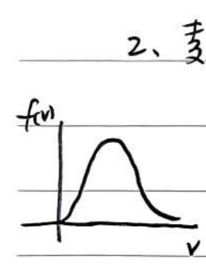
8.4 麦克斯韦速率分布律

1. 速率分布函数　$f(v)=\frac{dN}{Ndv}$　$f(v)dv=\frac{dN}{N}$

$\int_{v_1}^{v_2}f(v)dv=\frac{\Delta N}{N}$，分布在 v_1-v_2 的分子数占总分子数的比例

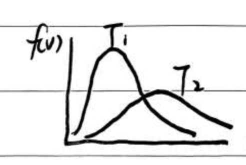
归一化条件　$\int_0^\infty f(v)dv=1$　$f(v)$：概率密度

2、麦克斯韦速率分布函数



$$f(v)=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}}e^{-\frac{mv^2}{2kT}}v^2$$

k：玻耳兹曼常量　m：单分子质量　T：温度



$T_2>T_1$

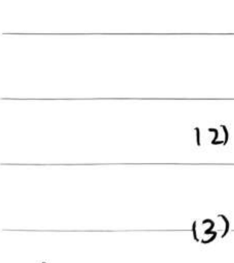
3、麦克斯韦分布律下三种统计速率

(1) 最概然速率

$\frac{df(v)}{dv}=0$　$v_p=\sqrt{\frac{2kT}{m}}=\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}=1.41\sqrt{\frac{RT}{\mu}}$

(2) 平均速率　$\bar{v}=\int_0^\infty vf(v)dv=\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}=\sqrt{\frac{8RT}{\mu\pi}}=1.60\sqrt{\frac{RT}{\mu}}$

(3) 方均根速率　$\overline{v^2}=\int_0^\infty v^2f(v)dv$



$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}=1.73\sqrt{\frac{RT}{\mu}}$

8.5 分子的平均碰撞频率和平均自由程

自由程：分子两次相邻碰撞之间自由通过的路程

分子平均自由程：　分子平均碰撞次数：一分子和其它分子碰撞次数

简化模型 (1) 分子刚性小球 (2) 直径 d (3) 其它分子静，一个动 $\bar{u}$

单位时间平均碰撞次数 $\bar{Z}=\pi d^2\bar{u}n$　考虑其他分子动 $\bar{u}=\sqrt{2}\bar{v}$

$\therefore$ 分子平均碰撞次数 $\bar{Z}=\sqrt{2}\pi d^2\bar{v}n$

平均自由程　$\bar{\lambda}=\frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2p}$　$(\bar{\lambda}=\frac{\bar{v}}{\bar{Z}})$

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_k=\frac{1}{2}m\overline{v^2}=\frac{3}{2}kT$$

(1) 温度是分子平均平动动能的量度

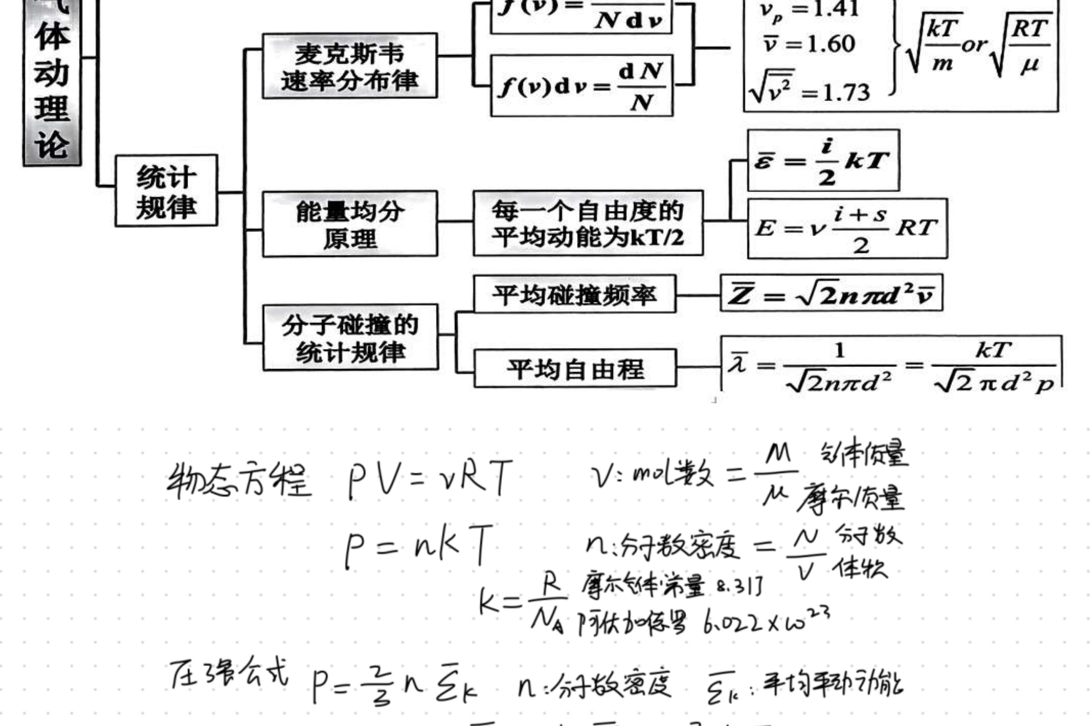
(2) 温度是大量分子的集体表现

(3) 在同一温度下各种气体分子平均动能相等

热运动与宏观运动：

温度反映分子无规则运动，和物体整体运动无关

物体的整体运动是其中所有分子的一种有规则运动的表现



物态方程　$PV=\nu RT$　　ν：mol数 $=\frac{M}{\mu}$ $\frac{气体质量}{摩尔质量}$

$P=nkT$　　n：分子数密度 $=\frac{N}{V}$ $\frac{分子数}{体积}$

$k=\frac{R}{N_A}$ $\frac{摩尔气体常量\ 8.31J}{阿伏加德罗\ 6.022\times10^{23}}$

压强公式　$P=\frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}_k$　n：分子数密度　$\bar{\varepsilon}_k$：平均平动动能

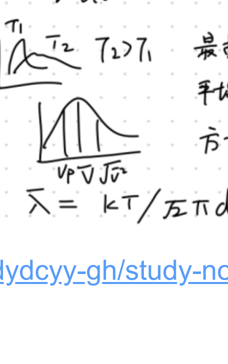
$\bar{\varepsilon}_k=\frac{1}{2}m\overline{v^2}=\frac{3}{2}kT$

$\sqrt{\overline{v^2}}$ 方均根速率 $=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$

分子平均内能 = 分子平均动能 + 分子 + 原子势能 $=\frac{1}{2}(r+t+2s)kT$

$\underbrace{\frac{1}{2}(t+r+s)kT}_{自由度}$　$\frac{1}{2}skT$　$\underset{单}{\frac{3}{2}RT}/\underset{非刚}{\frac{7}{2}RT}/\underset{刚}{\frac{5}{2}RT}$

速率分布　$f(v)=\frac{dN}{Ndv}$　$f(v)=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}}e^{-\frac{mv^2}{2kT}}v^2$



$T_2>T_1$

最概然速率　$v_p=\sqrt{\frac{2kT}{m}}=\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}=1.41\sqrt{}$

平均速率　$\bar{v}=\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}=1.60\sqrt{}$

方均根速率　$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}=1.73\sqrt{}$

平均自由程　$\bar{\lambda}=kT/\sqrt{2}\pi d^2p$

本笔记在https://github.com/dydcyy-gh/study-notes开源